

## **Характерные особенности изменения реологических свойств водно-зерновых суспензий в процессе водно-тепловой и ферментативной обработки (ВТФО) зернового сырья**

Новоселов А.Г., Чеботарь А.В., Ибрагимов Т.С.  
dekrosh@mail.ru

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики.  
Институт холода и биотехнологий*

***Представлены результаты исследования реологических характеристик водно-зерновых суспензий. Получены данные по изменению коэффициента эффективной вязкости суспензии с гидромодулем 1:2,5 в зависимости от температуры и скорости сдвига при отсутствии ферментных препаратов. Ключевые слова:*** ВТФО, реология, водно-зерновая суспензия, эффективная вязкость

Необходимость проведения реологических исследований водно-зерновых суспензий обусловлена стремлением более глубокого понимания физических явлений происходящих в процессе водно-тепловой, ферментативной их обработки. Только на основе достоверных данных по физико-механическим свойствам обрабатываемого сырья в различных аппаратах возможно создание оптимальной конструкции, в которой технологические процессы будут проводиться наиболее эффективно.

В последнее время большое внимание со стороны отечественных исследователей уделяется производству этанола из ячменного зерна [1 – 6].

Однако большинство работ посвящено изучению влияния различных ферментных препаратов и их дозировки на выход этанола [4], предварительной подготовке зерна к ВТФО путем воздействия на него инфракрасным излучением [4,6], поиску новых способов проведения ВТФО и их аппаратурного оформления [5].

Практически все упомянутые выше публикации, в той или иной мере, отмечают существенное возрастание вязкости водно-зерновых суспензий в процессе ВТФО, независимо от того, в аппарате какой конструкции и в каком рабочем режиме этот процесс проводился. Эта проблема становится более острой в виду стремления проводить ВТФО при низких гидромодулях, т.е. с высоким содержанием твердой фазы в заторе, и с наименьшими энергетическими затратами, в первую очередь, тепловыми.

Для того чтобы найти наиболее эффективное решение необходимо понять явления, происходящие в суспензионных потоках, возникающих в каналах технологических аппаратов и коммуникационных трубопроводах.

Одним из методов познания является системный анализ физических процессов происходящих при ВТФО зернового сырья, включающий в себя проведение комплексных реологических исследований.

Анализ научных публикаций по реологическим характеристикам водно-зерновых суспензий [1, 4 – 6] показывает, что представленные данные носят крайне поверхностный характер, т.к. большинство исследователей не ставили своей задачей получение расчетных зависимостей для предсказания коэффициентов эффективной вязкости в широком диапазоне изменяющихся исходных параметров зерна и рабочих параметров процесса. В основном ставилась задача получить данные по относительному снижению эффективной вязкости суспензии при применении того или иного ферментного препарата, того или иного температурного режима и т.п.

Проведенные нами предварительные исследования реологических характеристик водно-зерновых суспензий, без применения каких-либо ферментных препаратов в диапазоне изменения температуры от 20°C до 90°C, позволили получить некоторые общие закономерности изменения эффективной вязкости при начальной концентрации твердой фазы в суспензии и скорости сдвига. Все представленные ниже результаты исследований были выполнены на ротационном вискозиметре марки R2. Диапазон изменения скорости сдвига  $\gamma$  составлял  $1 \div 437,4 \text{ с}^{-1}$ .

В отличие от ранее опубликованных нами данных в работе [2, 3] эксперименты проводились по измененной методике. В работе [2] эксперимент проводился следующим образом. Заранее подготовленная к реологическим измерениям проба водно-зерновой суспензии в объеме 30 мл помещалась в измерительный цилиндр и имела начальную температуру 20°C. Во всех экспериментах в качестве зернового сырья использовался измельченный ячмень со 100 %-ым проходом через сито с отверстиями 1 мм.

При этой температуре для каждого значения скорости сдвига (конструкция реотеста R2 позволяла устанавливать 12 фиксированных значений сдвига) определяли  $\mu_{\text{эфф}}$ . Изменение скорости сдвига  $\gamma$  вели от меньших к большим значениям. Более того, при достижении максимального значения скорости сдвига начинали снижать значения  $\gamma$  при данной температуре. При достижении первоначального значения скорости сдвига  $\gamma = 1 \text{ с}^{-1}$  первый цикл измерений заканчивался, увеличивалась температура суспензии на 10 °C и эксперимент продолжался в той же последовательности. Длительность полного цикла измерений составляла ориентировочно 4 часа 36 минут. Она складывалась из длительности измерений каждого цикла, характеризующегося постоянной температурой – 24 минуты, в указанном диапазоне температур таких циклов 8 и времени необходимого для перехода на следующий температурный режим между циклами – около 12 минут.

В данной серии экспериментов методика их проведения заключалась в следующем. Устанавливались минимальная скорость сдвига  $\gamma = 1 \text{ с}^{-1}$  и минимальная температура – 20°C. Снималось значение  $\mu_{\text{эфф}}$ , которое мы

назвали начальной  $\mu_{эфф}$ . Затем, при этой же скорости сдвига изменялась температура суспензии на 1°С и, вновь фиксировалось  $\mu_{эфф}$ . Время проведения каждого измерения  $\mu_{эфф}$  строго фиксировалось по секундомеру. Таким образом, один цикл измерений представлял собой набор значений  $\mu_{эфф}$  при постоянной скорости сдвига, но при разных температурах. Следующий цикл проводился в той же последовательности, но при другом большем значении  $\gamma$ . При этом проба того же гидромодуля готовилась заново. В этой серии опытов были измерены значения  $\mu_{эфф}$  при тех же скоростях сдвига, что и в предыдущей серии экспериментов.

Такая постановка эксперимента позволила исключить влияние изменения величины скорости сдвига на структурно-механические свойства суспензии в процессе нагрева.

Практический интерес представляют значения эффективной вязкости на этапе загрузки зернового материала в аппарат. Обычно формирование затора производится исходя из заданного значения гидромодуля. Учитывая общие тенденции промышленности к проведению ВТФО при низких значениях гидромодуля, т.е. при гидромодуле 1:2,5, (массовое отношение зерна и воды равно 1кг измельченного зерна на 2,5 кг воды, что соответствует массовой концентрации суспензии 0,4 кг/кг) ниже представлены данные именно для этого гидромодуля. При этом температура сформированного затора (начальная температура) была принята 20°С. Таким образом, будем считать, что именно с этой температуры водно-зерновая суспензия (затор) начинает подвергаться ВТФО.

Ниже представлены результаты наших исследований двух серий экспериментов, выполненных по двум вышеупомянутым методикам. Обращаем внимание читателя на то, что в обеих сериях экспериментов, разжижающие ферменты не вносились. Ставилась задача оценить изменение величины  $\mu_{эфф}$  только от температуры и, возможно, других физических факторов.

Графическая обработка полученных данных по изменению  $\mu_{эфф}$  от температуры при постоянной скорости сдвига представлена на рис.1.

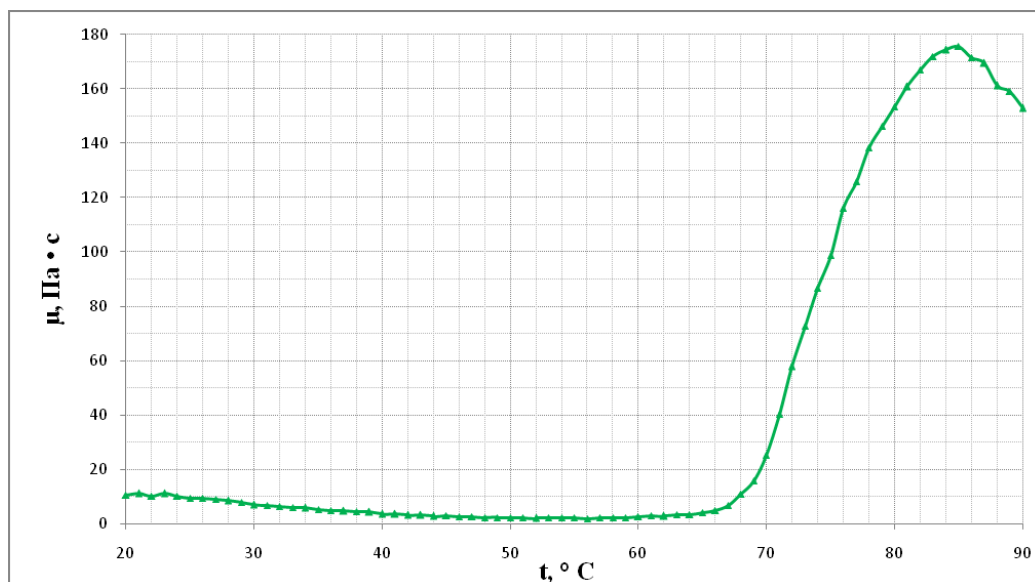


Рис.1. Зависимость  $\mu_{эфф}$  от температуры  $t$  при скорости сдвига  $\gamma = 3 \text{ с}^{-1}$  гидромодуль 1:2,5 (вода измельченный ячмень)

Представленный на рис.1 характер изменения  $\mu_{эфф}$  от температуры наблюдался для всех исследованных скоростей сдвига. Анализ кривых течения показывает наличие трех характерных зон плавно переходящих одна в другую по мере увеличения температуры. Первая зона (область температур  $20 \div 50^\circ\text{C}$ ) характеризуется небольшим снижением  $\mu_{эфф}$  по мере увеличения температуры. В этой области суспензия представляет собой классическую двухфазную смесь (жидкость - твердая фаза). Это можно объяснить снижением вязкости воды с повышением температуры. Темп снижения постепенно вырождается с повышением температуры до  $50^\circ\text{C}$ . Такое поведение кривых можно объяснить противоположным влиянием на  $\mu_{эфф}$  температуры и концентрации водорастворимых веществ, перешедших из зерна в воду. Вторая зона (область температур примерно  $50 \div 59^\circ\text{C}$ ) характеризуется постоянным значением  $\mu_{эфф}$ . Для разных скоростей сдвига температурные границы были различны, но все они входили в указанный выше диапазон. Третья область характеризовалась резким повышением вязкости суспензии. Выполненные исследования по второй методике позволили с достаточной степенью точности определить температуру начала процесса клейстеризации  $t_{кл}$ , которая лежала в диапазоне  $52 \div 59^\circ\text{C}$  для всех исследованных скоростей сдвига. С этого момента начинается активное разжижение крахмальных зерен. Они становятся вязко-пластичными и активно разбухают, частично растворяясь в воде. Таким образом, двухфазная смесь с ярко выраженной твердой фазой превращается в аморфную, гелеобразную жидкость с уменьшающейся в размерах твердой фазой, что собственно и приводит к резкому увеличению  $\mu_{эфф}$ . Диапазон температур, характеризующий третью область, лежит в пределах  $t_{кл} \div t_{max}$ . Значения  $t_{max}$  были определены в экспериментах выполненных по первой методике. Для

большинства значений скоростей сдвига численные значения  $t_{max}$  лежали в районе  $85^{\circ}\text{C}$ . В дальнейшем происходило снижение значений  $\mu_{эфф}$ .

Таким образом, можно констатировать, что в процессе ВТФО можно выделить три реперных значения  $\mu_{эфф}$  позволяющих контролировать процесс ВТФО. Это начальная вязкость затора при температуре складки  $\mu_{эфф1}$ , минимальное значение  $\mu_{эфф2}$  во второй зоне кривой течения и максимальное значение  $\mu_{эфф3}$  в третьей зоне кривой течения. Численные значения  $\mu_{эфф}$  в реперных точках кривой течения различны и зависят от величины гидромодуля и скорости сдвига. Для гидромодуля 1:2,5 величина начальной  $\mu_{эфф1}$  была определена нами на основании результатов наших экспериментов по обеим методикам. Графическая обработка результатов этих экспериментов приведена на рис.2.

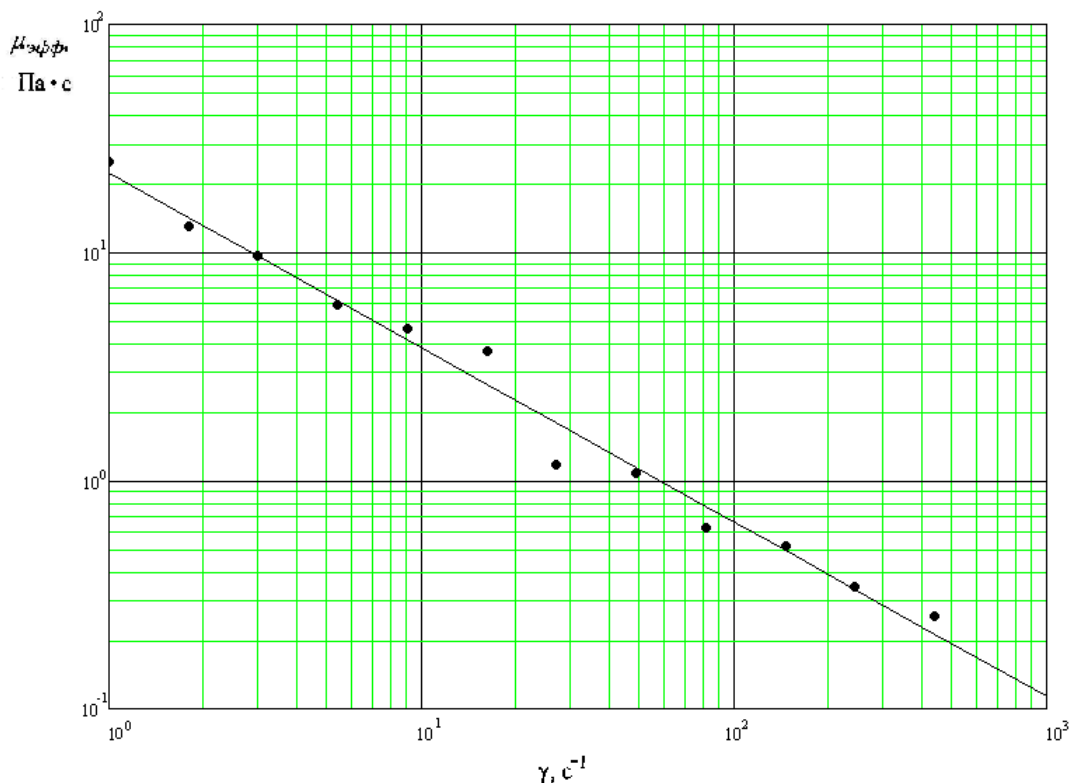


Рис.2. Зависимость начальной  $\mu_{эфф}$  от скорости сдвига  $\gamma$  при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  для гидромодуля 1:2,5

Как видно из рис. 2, на вязкость суспензии сильно влияет скорость сдвига. С увеличением скорости сдвига значение эффективной вязкости существенно уменьшается. При увеличении скорости сдвига от  $1\text{с}^{-1}$  до  $437\text{с}^{-1}$  значения  $\mu_{эфф}$  уменьшается от 25 Па·с до 0,2 Па·с. Таким образом можно предположить, что складку затора целесообразно вести в условиях интенсивного движения суспензии или перемешивания. Спрогнозировать начальные значения  $\mu_{эфф}$  для гидромодуля 1:2,5 при заданной скорости сдвига можно по эмпирическому уравнению, Па·с

$$\mu_{эфф1} = \frac{22,5}{\gamma^{0,76}}$$

где  $\gamma$  – скорость сдвига,  $\text{с}^{-1}$

### Список литературы:

1. Громов С.И. Прогрессивная теплоэнергосберегающая схема механико-ферментативной обработки сырья для спиртовых заводов малой мощности // Ликероводочное производство и виноделие. – 2011. №3, С. 7–10
2. Ибрагимов Т.С. Реологические характеристики зерновых суспензий в процессе механико-ферментативной обработки / Ибрагимов Т.С., Чеботарь А.В., Свинцов Д.В., Новоселов А.Г. // Научный журнал СПбНИУ ИТМО [Электронный ресурс]. - Санкт-Петербург: СПб НИУ ИТМО, 2012. - №2. - сентябрь. – Режим доступа: <http://www.open-mechanics.com/journals>
3. Ибрагимов Т.С. Исследование теплофизических свойств зерновых суспензий в процессе механико-ферментативной обработки / Ибрагимов Т.С., Чеботарь А.В., Новоселов А.Г. // Научный журнал СПбНИУ ИТМО [Электронный ресурс]. - Санкт-Петербург: СПб НИУ ИТМО, 2012. - №2. - сентябрь. – Режим доступа: <http://www.open-mechanics.com/journals>
4. Крикунова Л.Н., Сумина Л.И. Технология этанола на основе получения и сбраживания концентрированного суслу из ИК-обработанного ячменя. Часть 1. Подбор мультиэнзимной композиции // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2009. №2, С. 51-54
5. Степанов В.И., Римарева Л.В., Иванов В.В. и др. Комплексная переработка зернового сырья и фильтрата барды по одностадийной экструзионно-гидролитической технологии. // Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2011. № 1, С. 4–6.
6. Филатов В.В. и др. Инфракрасные технологии в переработке зернового сырья. // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. №8, С. 76-78

# **The features of changing the rheological properties of the water-grain suspense during the water-heating and ferment treatment (WHFT)**

Novoselov A.G., Chebotar A.V, Ibragimov T.S.

*Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics.*

*Institute of Refrigeration and Biotechnologies*

***In the article are shown results on studying of water-grain suspense rheological properties. Received results on changeover of the effective viscosity factor of the suspense with hydro module 1:2,5 depends on temperature and rate without ferments.***

***Key words:*** water-heat and ferment treatment (WHFT), rheology, water-grain suspense, effective viscosity